

# تحلیل و شبیه سازی فیلترهای وفقی به منظور کاهش تداخل در رادار روزنه مصنوعی و ارائه یک الگوریتم بهبود یافته ترکیبی

میثم بیات<sup>۱</sup> میلاد مرادی<sup>۲</sup> جلیل مظلوم<sup>۳</sup>

۱- استادیار- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری - تهران- ایران

[M\\_bayat@ssau.ac.ir](mailto:M_bayat@ssau.ac.ir)

۲- دانش آموخته کارشناسی ارشد- دانشکده مهندسی برق - انشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری - تهران- ایران

[milad3102@gmail.com](mailto:milad3102@gmail.com)

۳- دانشیار- دانشکده مهندسی برق - دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری - تهران- ایران

[Jalil.mazloum@ssau.ac.ir](mailto:Jalil.mazloum@ssau.ac.ir)

**چکیده:** در این مقاله سه نوع تداخل  $I_{RFNI}$ ،  $I_{NBLFMI}$  و  $I_{WBLFMI}$  بر روی سیگنال رادار SAR اعمال گردید. سپس به بررسی کاهش اثر تداخل به وسیله انواع فیلترهای وفقی پرداخته شد. بعد از پیاده سازی انواع فیلترهای وفقی با شرایط یکسان برای کاهش تداخل، عملکرد فیلترهای وفقی با یکدیگر مقایسه گردید. بر اساس نتایج شبیه سازی تصویر خروجی فیلتر کالمن نسبت به سایر فیلترهای موجود از کیفیت بالاتری برخوردار است. در ادامه به ارائه یک الگوریتم پیشنهادی جهت بهبود کاهش تداخل پرداخته شد. دقت کاهش تداخل در الگوریتم پیشنهادی به اندازه ۳ دسی بل نسبت به فیلتر کالمن بهبود یافت. این بهبود در ازای افزایش زمان پردازش به دست آمد. سرعت الگوریتم پیشنهادی ۵۵ مرتبه کمتر از فیلتر کالمن است. بنابراین در صورت نیاز به دقت بالا و داشتن سخت افزار قوی برای محاسبات پیچیده، استفاده از الگوریتم پیشنهادی باعث بهبود کاهش تداخل می گردد.

**واژه‌های کلیدی:** رادار تصویربرداری، رادار روزنه مصنوعی (SAR)، سیگنال هدف، تداخل، کاهش تداخل، فیلتر وفقی.

نوع مقاله: پژوهشی

DOI: 10.52547/jiaeee.19.3.37

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۰/۰۶/۰۱

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۴۰۰/۰۸/۱۰

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۹/۰۶

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر میثم بیات

نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران - تهران - مهرآباد جنوبی - خیابان دانشگاه هوایی - دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری - دانشکده‌ی

برق

## ۱- مقدمه

رادار<sup>۱</sup> یک سامانه رادیویی است که برای مشاهده، تشخیص و تعیین موقعیت هدف یا آشکارسازی اجسام و نیز اندازه‌گیری برخی ویژگی‌های آن‌ها به کمک امواج رادیویی به کار می‌رود [۱]. کاربرد اولیه رادار و محل پیدایش و رشد آن در صنایع نظامی و هوانوردی بوده است. رادار SAR<sup>۲</sup> که به رادار روزنه مصنوعی معروف است یک رادار تصویر برداری است [۱، ۲]. این نوع رادار با نصب روی هواپیما و ماهواره مورد استفاده قرار می‌گیرد. رادار روزنه مصنوعی با طول آنتن کوچک‌تر نسبت به آنتن سایر رادارها، تصاویری با دقت تفکیک بالاتر تولید می‌کند [۳]. این نوع رادار کاربردهای فراوانی همچون اقیانوس‌شناسی، کشاورزی، زمین‌شناسی و نظامی دارد. تصاویر گرفته شده توسط این رادار بسیار شبیه تصاویر دوربین‌های مرئی و مادون قرمز است [۴].

در سال‌های اخیر طیف فرکانس رادیویی به دلیل گسترش صنعت بی‌سیم تجاری به شدت شلوغ شده است. این امر برای سامانه‌های تصویر برداری راداری مشکل ساز است. سیگنال‌های راداری با باند پهن به شدت نسبت به تداخل فرکانس رادیویی ناشی از انتشار طیفی آسیب‌پذیر هستند. یکی از انواع این تداخل‌ها، سامانه‌های ارتباطی هستند که از باندهای طیفی مجاور استفاده می‌کنند. داده‌های اندازه‌گیری شده SAR در اثر تداخل ناشی از امواج سامانه‌های الکترونیکی در باند فرکانسی نزدیک مانند سامانه‌های ارتباطی، رادارها، شبکه‌های تلویزیونی و دیگر منابع تابش نظامی تخریب می‌شوند.

تداخل باعث تخریب سیگنال شده و بدین ترتیب اطلاعات مفید سیگنال اکو را از بین می‌برد [۳، ۴]. حضور تداخل سبب کاهش دقت تفکیک و بی کیفیت شدن تصویر می‌شود. بنابراین کاهش تداخل برای به دست آوردن تصویر با کیفیت امری ضروری است.

در مقاله [۵] برای کاهش تداخل از روش‌های فیلتر شکافی<sup>۳</sup>، شبکه عصبی کانولوشنی استفاده گردیده است. در مقاله [۶] از روش row-sparse بهبود یافته برای حذف تداخل فرکانس رادیویی استفاده شده است. همچنین در مقاله [۷] از فیلتر شکافی و الگوریتم تجزیه تکرارشونده<sup>۴</sup> استفاده شده است. برخی محققان سیگنال را به یک دامنه خاص تبدیل کردند (به عنوان مثال، دامنه فرکانس و دامنه فرکانس-زمان) و یک فیلتر برای حذف سیگنال‌های تداخل دار با پهنای باند خاص طراحی کرده‌اند. تداخل فرکانس رادیویی را می‌توان به طور مؤثر با این روش‌ها حذف کرد. با این وجود، هنگامی که RFI دارای یک پهنای باند گسترده باشد همپوشانی زیادی بین تداخل‌ها وجود دارد و باعث از بین رفتن سیگنال هدف می‌شوند [۴، ۸]. این روش‌ها می‌توانند از نظر حذف تداخل با برآورد دقیق مدل سیگنال و پارامترها، با هزینه افزایش بار محاسباتی به خوبی عمل کنند.

برخی از محققان سیگنال تداخل را با ایجاد یک مدل ریاضی مشخص می‌کنند و سپس آن را از سیگنال بازتاب کم می‌کنند [۹].

۱۰. این روش‌ها می‌توانند به عملکرد خوبی در زمینه حذف تداخل با تخمین دقیق مدل سیگنال و پارامترها با هزینه افزایش در بار محاسباتی و کاهش کارایی سیستم دست یابند. محققان دیگر از تفاوت‌های مربوط به خصوصیات آماری بین سیگنال هدف و سیگنال تداخل استفاده کرده الگوریتم‌های جداسازی منبع مانند فیلتر زیر فضایی ویژگی‌ها، تجزیه و تحلیل مؤلفه‌های مستقل (ICA)، آنالیز فضای مستقل (ISA)، و فیلتر تطبیقی از پارامترهای این دسته‌اند.

در این مقاله برای کاهش تداخل در تصویر SAR از فیلترهای وقتی استفاده شده است. همچنین یک فیلتر از ترکیب فیلتر کالمن و NLMS ساخته شده به طوری که قسمت حقیقی سیگنال به فیلتر کالمن و قسمت موهومی آن به فیلتر NLMS داده شد. سرانجام خروجی فیلترها با یکدیگر ترکیب گردید و سیگنال مختلط رادار روزنه مصنوعی بازسازی شد. الگوریتم ارائه شده SIR خروجی را نسبت به فیلتر کالمن به میزان ۳ دسی بل بهبود داد. باید توجه داشت که تداخل به صورت کامل حذف نخواهد شد و اثرات جزئی آن در تصویر باقی می‌ماند.

مطالب بیان شده در هر بخش به ترتیب به صورت زیر می‌باشد: در ادامه در بخش دوم اصول و نحوه عملکرد رادار روزنه مصنوعی آورده شده است. در بخش سوم انواع تداخل در رادار روزنه مصنوعی و روابط آن بیان گردیده‌اند. همچنین در این بخش نتیجه شبیه سازی تصویر اصلی رادار و اعمال تداخل روی آن آورده شده است. در بخش چهارم انواع فیلتر وقتی در نرم افزار متلب با شرایط یکسان پیاده سازی شد. در بخش پنجم یک فیلتر ترکیبی بهبود یافته ارائه و شبیه‌سازی گردید. در ادامه این بخش میزان کاهش تداخل با اعمال الگوریتم پیشنهادی برای نسبت های مختلف سیگنال به تداخل در ورودی الگوریتم محاسبه و با خروجی الگوریتم های موجود مقایسه گردید. در بخش ششم نتیجه گیری آورده شده است.

## ۲- رادار روزنه مصنوعی

رادارها از نظر نوع آنتن و نحوه پردازش تصویر به دو دسته روزنه واقعی<sup>۵</sup> و روزنه مصنوعی تقسیم می‌شوند. به میزان توانایی رادار جهت تفکیک اشیاء مختلف از همدیگر دقت تفکیک<sup>۶</sup> گفته می‌شود. دقت تفکیک در رادار روزنه واقعی رابطه مستقیم با طول آنتن رادار دارد. در نتیجه برای تشکیل تصویر با دقت تفکیک بالا در این نوع رادار به آنتن بسیار بلندی نیاز است. افزایش طول آنتن محدودیت‌هایی دارد. بنابراین از فن‌آوری رادار روزنه مصنوعی که دقت تفکیک آن مستقل از طول آنتن است استفاده می‌شود [۱۱]. رادار روزنه مصنوعی کاربردهای فراوانی همچون اقیانوس‌شناسی، سنجش رطوبت خاک، جنگل زدایی، پایش زلزله و آتش‌فشان و امور نظامی دارد. این رادار به وسیله هواپیما و ماهواره قابل استفاده می‌باشد [۱۱، ۱۲].

رادار روزنه مصنوعی به دو صورت نواری<sup>۷</sup> و نورافکنی<sup>۸</sup> کار می‌کند [۱۱، ۱۲]. برای جدا کردن اشیاء در جهت متقابل و در امتداد مسیر در

طبق مقاله ارائه شده توسط جوشا و همکارانش در سال ۲۰۱۲ یک سامانه رادار روزنه مصنوعی هواپرد، داده‌های مربوط به یک ناحیه به قطر ۵ کیلومتر را در ۳۱ دور مدار که شامل تعدادی خودرو غیرنظامی بود به دست آورد [۱۵]. مشخصات کلی رادار تصویربردار در جدول (۱) قابل مشاهده است. این مقاله فنی توسط نیروی هوایی ایالات متحده تأیید شده است. بر اساس این مقاله امکان تشکیل تصویر رادار SAR روی هر یک از اهداف امکان پذیر است. برای اعمال تداخل و کاهش آن به کمک فیلتر وقتی از تصویر گرفته شده رادار روزنه مصنوعی از خودرو میتسوبیشی گالانت در مقاله جوشا استفاده شده است.



شکل (۳): تصویر برداری از یک منطقه به شعاع ۵ کیلومتر توسط رادار روزنه مصنوعی [۱۵]

جدول (۱): مشخصات رادار تصویر بردار [۱۵]

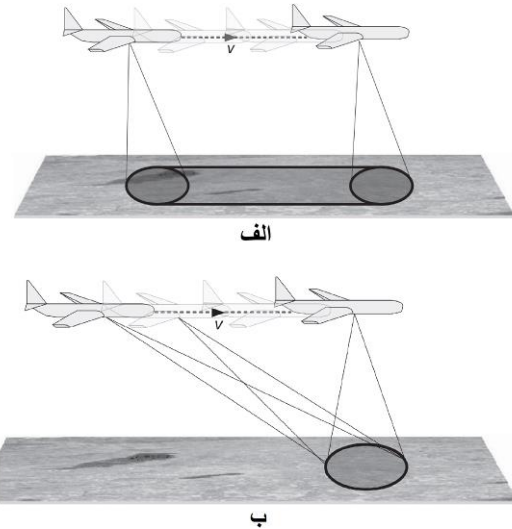
مقدار	پارامتر
هواپیما	نوع سکو رادار
۵ کیلومتر	قطر منطقه تصویر برداری
circular	حالت تصویر برداری
۳۱	تعداد مدار
۹/۷GHz	فرکانس مرکزی
۳۶۰ درجه	زاویه در نظر گرفته شده برای هر هدف

### ۳- مدل تداخل در رادار روزنه مصنوعی

هدف استفاده از رادار روزنه مصنوعی دستیابی به تصویر با دقت تفکیک بالا است. تداخل‌های ناشی از عوامل طبیعی و تداخل‌های عمدی حاصل از جرمها موجب تخریب تصویر رادار روزنه مصنوعی می‌گردد.

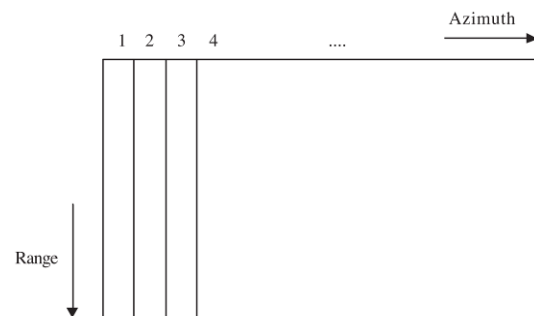
از نظر نسبت پهنای باند تداخل به سیگنال مفید، تداخل‌ها به طور کلی به دو گروه تقسیم می‌شوند. تداخل باند باریک ( $NBI^{13}$ ) که در آن نسبت پهنای باند تداخل به سیگنال مفید کوچکتر از ۱٪ است. تداخل پهن باند ( $WBI^{14}$ ) که در آن نسبت پهنای باند تداخل به سیگنال مفید بیشتر از ۱۰٪ است [۱۶، ۱۷]. کاهش اثر تداخل در  $NBI$  در مقایسه با  $WBI$  بسیار ساده‌تر است [۱۷].

یک تصویر راداری، دو روش متفاوت باید پیاده‌سازی شوند. جهت گیری عرضی که به عنوان جهت برد<sup>۱۵</sup> در تصویربرداری راداری هم شناخته می‌شود، بر جهت تصویربرداری عمود است. در این راستا، بازتاب رادار با استفاده از تأخیر زمانی بین پژواک‌های بازگشتی از عناصر سطحی مختلف جدا می‌شود. امتداد مسیر که به جهت سمت ۱۰ نیز معروف است، موازی با حرکت سکوی تصویربرداری است [۱۲].



شکل (۱): (الف) تصویر برداری نواری (ب) تصویر برداری نورافکنی [۲]

برخلاف سامانه‌های نوری افزایش دقت تفکیک در رادار بر اساس خصوصیات امواج ماکروویو و همچنین تأثیرات هندسی انجام می‌پذیرد [۱۲، ۱۳]. در رادارهایی که از یک آنتن جهت ارسال امواج استفاده می‌کنند یک پالس موج ارسال می‌شود و با دریافت پژواک آن توسط گیرنده تصویر تشکیل می‌شود. دقت تفکیک را می‌توان در دو راستا بررسی کرد. در جهت سمت ناحیه تصویر که دقت سمت ۱۱ نامیده می‌شود و در جهت برد که آن را دقت برد<sup>۱۶</sup> می‌نامند [۱۳، ۱۴].



شکل (۲): فضای دوبعدی داده در SAR

### ۲-۱- تصویر رادار روزنه مصنوعی

اگر دریافتی رادار روزنه مصنوعی را می‌توان به صورت زیر مدل کرد:

$$S(\tau) = R(\tau) + I(\tau) + N(\tau) \quad (1)$$

که  $\tau$  زمان،  $R(\tau)$  سیگنال اصلی،  $I(\tau)$  سیگنال تداخل و  $N(\tau)$  نویز است. نویز سامانه با نویز گاوسی تقریب زده شده است [۱۳، ۱۴].

هر پارامتر به صورت تصادفی از مقادیر مجاز آن انتخاب می شود. سپس با جایگزاری این مقادیر در رابطه (۵)، سیگنال های تداخل ساخته می شوند.

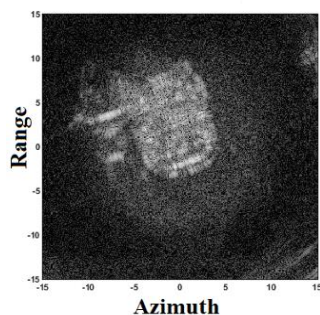
جدول (۲): پارامترهای سیگنال تداخل [۱۸]

نوع تداخل	پارامترها	مقدار
RFNI	بازه فرکانس (MHz)	(توزیع یکنواخت) ۰-۵۰
	بازه پهنای پالس (μs)	(توزیع یکنواخت) ۱.۲۵-۱.۶۶
	بازه دامنه (dB)	(توزیع رابلی) ۳۰-۴۰
NBLFMI	بازه پهنای باند (MHz)	(توزیع یکنواخت) ۰.۰۱-۰.۵
	بازه پهنای پالس (μs)	(توزیع یکنواخت) ۱.۲۵-۱.۶۶
	بازه دامنه (dB)	(توزیع یکنواخت) ۳۰-۴۰
WBLFMI	بازه پهنای باند (MHz)	(توزیع یکنواخت) ۵-۱۰
	بازه پهنای پالس (μs)	(توزیع یکنواخت) ۱.۲۵-۱.۶۶
	بازه دامنه (dB)	(توزیع یکنواخت) ۳۰-۴۰

در این مقاله برای به دست آوردن پالس های اکو حاوی سیگنال های تداخل، سیگنال اصلی که همان داده های یک تصویر واقعی SAR است با انواع تداخل های اشاره شده جمع می شوند. سپس با شبیه سازی و استفاده از فیلترهای وقتی موجود و همچنین با ارائه یک الگوریتم پیشنهادی به کاهش تداخل پرداخته خواهد شد.

### ۳-۱- تداخل در تصویر رادار روزنه مصنوعی

در این مقاله برای انجام شبیه سازی ها از یک تصویر خودرو با دقت تفکیک ۳۲۴×۳۲۴ با توجه به مقاله جوشا که در بخش ۱-۲ بیان گردید استفاده شده است.



شکل (۴): تصویر گرفته شده از خودرو میتسوبیشی گالانت توسط رادار روزنه مصنوعی

همان طور که در بخش ۲ گفته شد تصویر رادار روزنه مصنوعی در دو بعد برد و سمت ساخته می شود. همچنین در شکل (۵) نیز تصویر تخریب شده خودرو با سه نوع تداخل قابل مشاهده است.

با توجه به این که تداخل پهن باند عموماً از سایر سامانه های راداری حاصل می شود، می توان آن را با سیگنال مدولاسیون فرکانس خطی مدل سازی کرد [۱۸]. اگر تداخل NBI فقط به یک صورت مدل سازی شود نمی تواند شامل تداخل های متعددی باشد که SAR تحت تأثیر آن قرار گرفته است. بنابراین، در این مقاله ابتدا بر اساس واقعیات به ارائه مدل NBI با مجموع تداخل فرکانس رادیویی با تعدیل سینوسی و NBI مدوله شده فرکانس خطی پرداخته شده است. چنین روش مدل سازی باعث دقت در ایجاد تداخل واقعی می شود و سنجش عملکرد روش های مختلف کاهش تداخل را بهبود می بخشد. در این مقاله سیگنال تداخل به عنوان مجموع سیگنال تداخل نویز فرکانس رادیویی (RFNI<sup>۱۵</sup>)، سیگنال تداخل مدوله شده با فرکانس خطی باند باریک (NBLFMI<sup>۱۶</sup>) و سیگنال تداخل مدوله شده با فرکانس خطی پهن باند (WBLFMI<sup>۱۷</sup>) مدل شده است [۱۸، ۱۶].

تداخل RFNI را می توان به صورت زیر نوشت:

$$I_{RFNI}(\tau) = \sum_{r=1}^{L_R} A_R(\tau) \text{rect}(\tau / T_R) \exp\{j[2\pi f_R \tau + \phi_R]\} \quad (2)$$

که  $I_{RFNI}(\tau)$  سیگنال RFNI، دامنه  $A_R(\tau)$ ، پهنای پالس،  $\phi_R$  فاز،  $f_R$  نشان دهنده فرکانس RFNI،  $L_R$  مقادیر سیگنال تداخل را نشان می دهند. رابطه سیگنال تداخل مدوله شده با فرکانس خطی باند باریک به صورت زیر است:

$$I_{NBLFMI}(\tau) = \sum_{n=1}^{L_N} A_n(\tau) \text{rect}(\tau / T_n) \exp\{j[\pi k_n \tau^2 + \phi_n]\} \quad (3)$$

که  $I_{NBLFMI}(\tau)$  سیگنال NBLFML، دامنه  $A_n(\tau)$  سیگنال،  $T_n$  پهنای پالس،  $\phi_n$  فاز،  $L_N$  مقادیر سیگنال تداخل و  $K_n$  نرخ chirp سیگنال NBLFML را نشان می دهند. سیگنال تداخل مدوله شده با فرکانس خطی پهن باند به صورت زیر است:

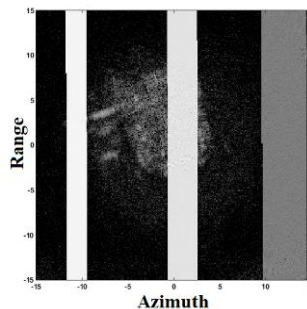
$$I_{WBLFMI}(\tau) = \sum_{w=1}^{L_W} A_w(\tau) \text{rect}(\tau / T_w) \exp\{j[\pi k_w \tau^2 + \phi_w]\} \quad (4)$$

که  $I_{WBLFMI}(\tau)$  سیگنال WBLFML، دامنه سیگنال تداخل،  $T_w$  پهنای پالس،  $\phi_w$  فاز،  $L_W$  مقادیر سیگنال تداخل و  $K_w$  نرخ chirp سیگنال WBLFML را نشان می دهند. به صورت کلی و در نظر گرفتن شیفت زمانی رابطه تداخل به صورت زیر نوشته می شود.

$$\begin{aligned} I_{RFNI}(\tau) &= A_R(\tau) \text{rect}((\tau - \tau_R) / T_R) \exp\{j[2\pi f_R(\tau - \tau_R) + \phi_R]\} \\ I_{NBLFMI}(\tau) &= A_N(\tau) \text{rect}((\tau - \tau_N) / T_N) \exp\{j[\pi K_N(\tau - \tau_N)^2 + \phi_N]\} \quad (5) \\ I_{WBLFMI}(\tau) &= A_W(\tau) \text{rect}((\tau - \tau_W) / T_W) \exp\{j[\pi K_W(\tau - \tau_W)^2 + \phi_W]\} \end{aligned}$$

که  $A_i(\tau)$  دامنه،  $\phi_i$  فاز،  $\tau_i$  شیفت زمان و  $T_i$  و پهنای پالس سیگنال مربوطه را نشان می دهند. در این عبارت، همه پارامترها از توزیع یکنواخت پیروی می کنند، به جز  $A_R(\tau)$  که از توزیع رابلی پیروی می کند [۱۹-۱۸-۷]. در جدول (۱) به صورت خلاصه بازه مجاز و نوع توزیع هر یک از پارامترهای روابط سه نوع تداخل آورده شده است. شبیه سازی تداخل در رادار روزنه مصنوعی با توجه به جدول (۲) به گونه ای انجام شده است که با هر بار اجرا کردن در نرم افزار متلب،

برای ایجاد شرایط یکسان مقایسه روش‌ها، در تمامی فیلترها // برابر 0/1 و L برابر 8 و SIR<sup>20</sup> تصویر ورودی فیلتر برابر 19/3713- در نظر گرفته شد. برای مقایسه دقت فیلترها از مقایسه طیف فرکانسی سیگنال بدون تداخل، سیگنال با تداخل و سیگنال بعد از کاهش تداخل استفاده شده است. از آنجا که فیلترهای افقی به خودی خود موجب تغییراتی در طیف فرکانسی یک سیگنال می‌شوند، منظور از سیگنال بدون تداخل، خروجی فیلتر افقی با در نظر گرفتن سیگنال ورودی بدون تداخل است. پس هرچه خروجی فیلتر به سیگنال بدون تداخل نزدیک‌تر باشد بیانگر دقت بالای فیلتر است. در نهایت در بخش 5 یک الگوریتم بهبود یافته برای کاهش تداخل ارائه و شبیه سازی شده است.



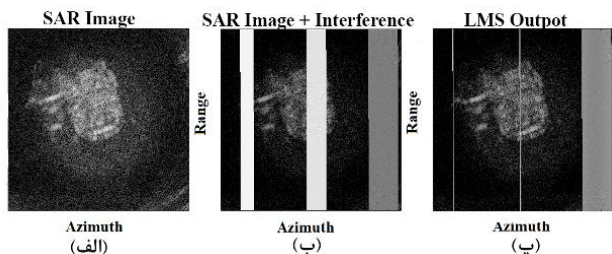
شکل (5): تداخل در تصویر رادار روزنه مصنوعی به ترتیب از سمت چپ تداخل نوع اول، نوع دوم و نوع سوم

#### 4-1- فیلتر افقی LMS

فیلتر LMS با مشخصات جدول (3) برای کاهش تداخل رادار روزنه مصنوعی در نرم افزار متلب پیاده سازی شد:

جدول (3): پارامترهای فیلتر LMS

پارامتر	مقدار
Length	8
Step Size ( $\mu$ )	0/1
Initial Conditions	0



شکل (7): (الف) تصویر اصلی، (ب) تصویر با تداخل‌ها و (پ) تصویر خروجی فیلتر LMS

همان‌طور که شکل (7) مشاهده شد فیلتر LMS نتوانست تداخل را حذف کند و حتی تداخل نوع سوم اصلاً کاهش پیدا نکرد. مقدار SIR خروجی فیلتر 5/2268- است.

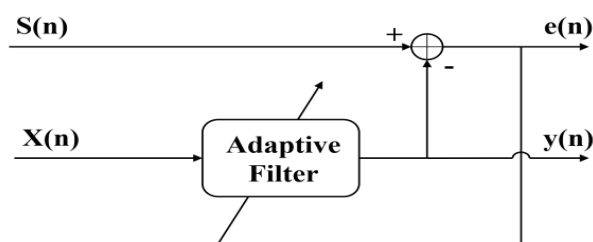
#### 4-2- فیلتر NLMS

فیلتر NLMS با مشخصات جدول (3) در نرم افزار متلب پیاده سازی شد:

#### 4-2- نتایج شبیه سازی فیلترهای افقی به منظور کاهش تداخل

امروزه فیلترهای افقی<sup>18</sup> به دلیل پردازنده‌های سیگنال دیجیتال قوی و پیشرفت‌های الگوریتم‌های افقی جدید، در حوزه‌های علوم مختلف مانند مخابرات، رادار، پردازش سیگنال‌های صوتی و رادیویی و حذف نویز به کار گرفته می‌شوند [19].

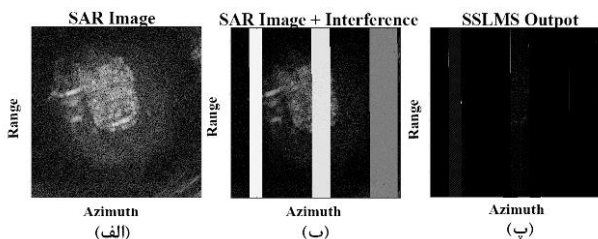
فیلترهای افقی فیلترهای دیجیتالی هستند که ضرایب آن‌ها با هدف تغییر فیلتر به حالت مطلوب تغییر می‌کند. معیار بهینه سازی یک تابع هزینه است که معمولاً میانگین مربع سیگنال خطا بین خروجی فیلتر افقی و سیگنال مورد نظر است. همان‌طور که فیلتر ضرایب خود را تطبیق می‌دهد، میانگین مربعات خطا<sup>19</sup> به حداقل مقدار خود نزدیک می‌شود. در این حالت، فیلتر تطبیق داده می‌شود و ضرایب به یک نتیجه همگرا شده‌اند. هنگامی که مشخصات داده ورودی که به محیط فیلتر معروف است تغییر داده شود، فیلتر با تولید یک مجموعه ضریب جدید با محیط جدید سازگار می‌شود [6، 19].



شکل (6): کاهش تداخل با یک فیلتر افقی [18]

در ادامه این بخش انواع فیلترهای افقی برای سیگنال تداخلی و تصاویر یکسان رادار روزنه مصنوعی به منظور ارزیابی عملکرد آن‌ها در کاهش تداخل پیاده سازی و مقایسه شده‌اند. از الگوریتم ژنتیک برای کاربردهای تخمین با دقت بالا و آرایه الگوریتم‌های بهینه‌سازی استفاده می‌شود [20]. در عمل برای کاهش موثرتر تداخل با استفاده از روش‌های افقی، ابتدا باید وجود تداخل و نوع تداخل در سیگنال اکوی بازگشتی رادار روزنه مصنوعی تشخیص داده شود. این کار با استفاده از الگوریتم ژنتیک یا شبکه‌های عصبی انجام می‌شود.



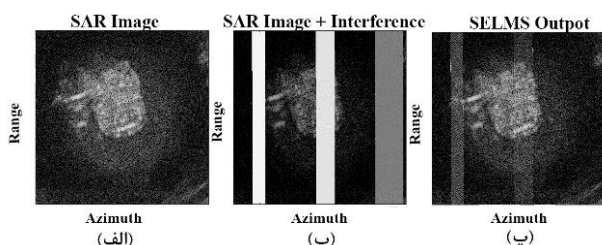


شکل (۱۱): (الف) تصویر اصلی، (ب) تصویر با تداخل ها و (پ) تصویر خروجی فیلتر SSLMS

همان طور که در شکل (۱۱) مشاهده شد فیلتر SSLMS علاوه بر اینکه نتوانست تصویر را بهبود دهد موجب حذف کل تصویر نیز گردید. مقدار SIR خروجی فیلتر ۱۷/۷۹۴۹- است.

#### ۴-۵- فیلتر SELMS

فیلتر SELMS با مشخصات جدول (۳) زیر در نرم افزار متلب پیاده سازی شد.



شکل (۱۲): (الف) تصویر اصلی، (ب) تصویر با تداخل ها و (پ) تصویر خروجی فیلتر SELMS

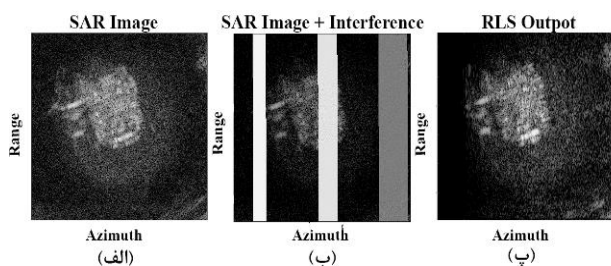
همان طور که در شکل (۱۲) مشاهده شد فیلتر SELMS اندکی تصویر را بهبود داد و آثار تداخل در تصویر باقی مانده است. مقدار SIR خروجی فیلتر ۷/۱۳۲۱ است.

#### ۴-۶- فیلتر RLS

فیلتر RLS با مشخصات جدول (۴) در نرم افزار متلب پیاده سازی شد.

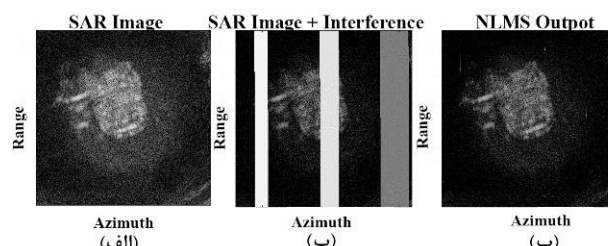
جدول (۴): پارامترهای فیلتر RLS

پارامتر	مقدار
Length	۸



شکل (۱۳): (الف) تصویر اصلی، (ب) تصویر با تداخل ها و (پ) تصویر خروجی فیلتر RLS

همان طور که در شکل (۱۳) مشاهده شد فیلتر RLS تصویر را بهبود داد. این فیلتر در کاهش تداخل نوع دوم و سوم تأثیر بهتری داشت. اما

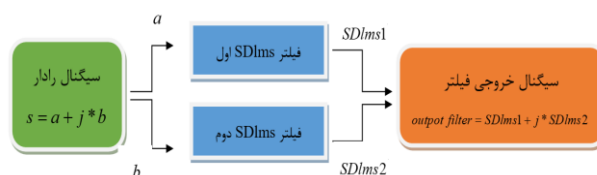


شکل (۸): (الف) تصویر اصلی، (ب) تصویر با تداخل ها و (پ) تصویر خروجی فیلتر NLMS

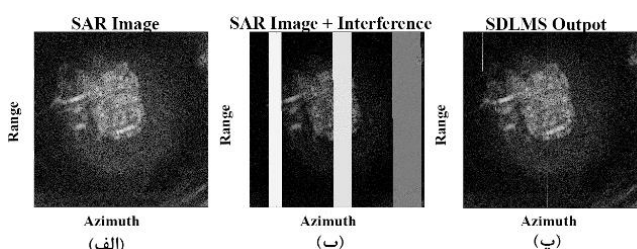
همان طور که در شکل (۸) مشاهده شد فیلتر NLMS تصویر را تا حدی بهبود داد. مقدار SIR خروجی فیلتر ۱۴/۰۷۹۶ است.

#### ۴-۳- فیلتر SDLMS

از آنجا که ورودی فیلتر SDLMS باید حقیقی باشد و سیگنال رادار SAR یک سیگنال مختلط است پس از دو فیلتر یکسان SDLMS استفاده شد که از یکی قسمت حقیقی سیگنال و از دیگری قسمت موهومی سیگنال عبور می کند. سرانجام خروجی های دو فیلتر به صورت شکل (۹) ترکیب شد و تصویر رادار بازسازی گردید. فیلترهای SDLMS با مشخصات جدول (۳) در نرم افزار متلب پیاده سازی شده اند:



شکل (۹): ساختار ترکیب دو فیلتر SDLMS



شکل (۱۰): (الف) تصویر اصلی، (ب) تصویر با تداخل ها و (پ) تصویر خروجی فیلتر SDLMS

همان طور که در شکل (۱۰) مشاهده شد فیلتر SDLMS تصویر را تا حدی بهبود داد و در حذف تداخل نوع سوم توانمندتر بود. مقدار SIR خروجی فیلتر ۱۱/۵۹۰۲ است.

#### ۴-۴- فیلتر SSLMS

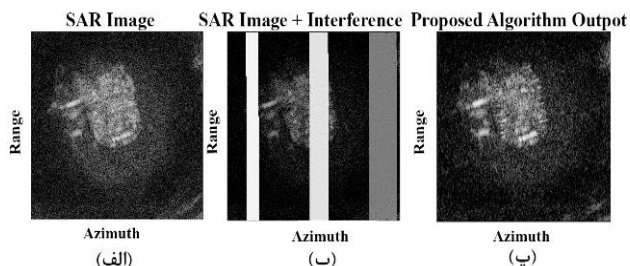
فیلتر SSLMS با مشخصات جدول (۳) در نرم افزار متلب پیاده سازی شد.

جدول (۶): پارامترهای فیلتر پیشنهادی

پارامتر فیلتر کالمن	مقدار	پارامتر فیلتر NLMS	مقدار
Q	۰/۰۰۱۴	Length	۸
R	۲	Step Size ( $\mu$ )	۰/۱
-	-	Initial Conditions	۰

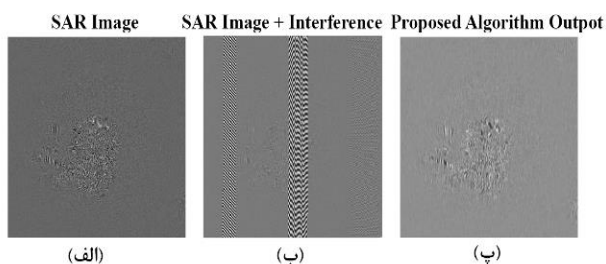
مقدار SIR ورودی مانند تمام روش های قبل برابر ۱۹/۳۷۱۳-

است.

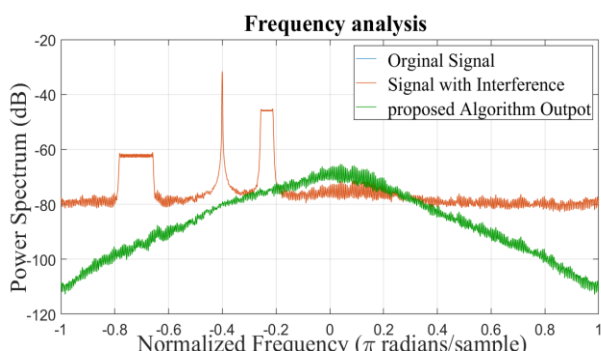


شکل (۱۶): الف) تصویر اصلی، ب) تصویر با تداخل ها و پ) تصویر خروجی الگوریتم پیشنهادی

از آنجا که تصویر مختلط رادار روزنه مصنوعی به سادگی قابل دسترس نیست در بعضی مقالات از یک تصویر خاکستری حقیقی استفاده می کنند. در این مقاله نیز برای دیدن بهتر تداخل در تصویر و تاثیر فیلتر در کاهش آن، قسمت حقیقی تصویر اصلی در شکل (۱۷) آورده شده است.



شکل (۱۷): الف) تصویر حقیقی رادار، ب) تصویر با تداخل ها و پ) تصویر خروجی الگوریتم پیشنهادی



شکل (۱۸): تحلیل فرکانسی سیگنال اصلی، سیگنال با تداخل ها و خروجی الگوریتم پیشنهادی

همان طور که در شکل (۱۸) مشاهده شد فیلتر پیشنهادی تصویر را بهتر از فیلتر کالمن بهبود داد. مقدار SIR خروجی فیلتر پیشنهادی

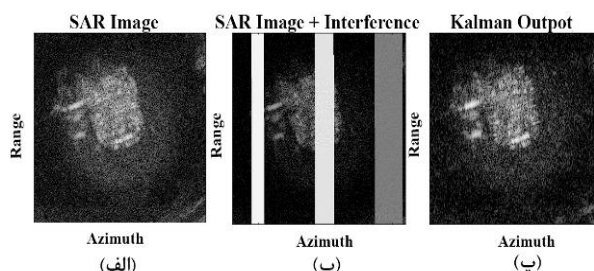
هنگام کاهش تداخل نوع اول موجب حذف تصویر گردید. مقدار SIR خروجی فیلتر ۲۱/۲۸۷۲ است.

#### ۷-۴ - فیلتر Kalman

فیلتر کالمن با مشخصات جدول (۵) در نرم افزار متلب پیاده شد.

جدول (۵): پارامترهای فیلتر Kalman

پارامتر	مقدار
Q	۰/۰۰۱۴
R	۲



شکل (۱۴): الف) تصویر اصلی، ب) تصویر با تداخل ها و پ) تصویر

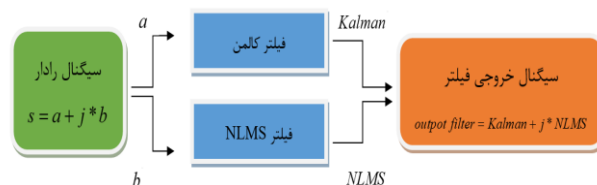
#### خروجی فیلتر Kalman

همان طور که در شکل (۱۴) مشاهده شد فیلتر Kalman تصویر را بهبود داد. این فیلتر در کاهش هر سه نوع تداخل به طور یکسان عمل نمود. مقدار SIR خروجی فیلتر ۳۷/۳۱۵۰ است.

با بررسی نتایج مشاهده می شود که فیلتر NLMS نسبت به سایر روش ها در کاهش قسمت موهومی تداخل سیگنال رادار SAR عملکرد بهتری داشت. از طرفی این فیلتر دارای دقت و سرعت مناسبی بود. فیلتر کالمن بالاترین دقت را در کاهش تداخل نسبت به سایر روش ها داشت. همچنین فقط فیلتر NLMS و فیلتر کالمن در کاهش هر سه نوع تداخل به طور یکسان عمل نمودند.

#### ۵- روش پیشنهادی جهت کاهش تداخل

از آنجا که فقط فیلتر NLMS و فیلتر کالمن در کاهش هر سه نوع تداخل عملکرد یکسانی داشتند. بنابراین یک فیلتر جدید از ترکیب فیلتر کالمن و NLMS ساخته شد. به طوری که قسمت حقیقی سیگنال رادار SAR از فیلتر کالمن و قسمت موهومی آن از فیلتر NLMS عبور می کند. سرانجام خروجی های دو فیلتر به صورت شکل (۲۱) ترکیب شد و تصویر رادار بازسازی گردید.



شکل (۱۵): ساختار ترکیب دو فیلتر کالمن و NLMS

فیلترها با مشخصات جدول (۶) در نرم افزار متلب پیاده سازی

شده اند:

جدول (۷): مقایسه فیلترهای وقتی از نظر سرعت و دقت

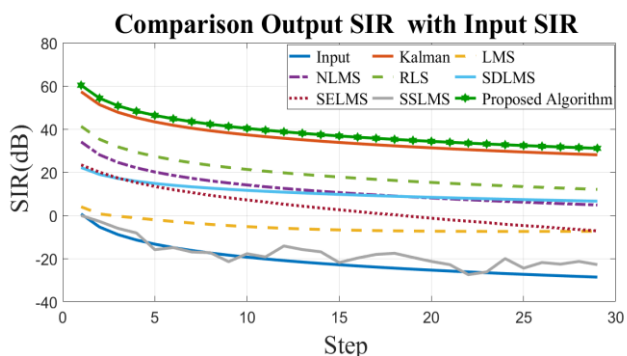
تعداد فیلتر	زمان اجرای ۳۰ مرتبه (ثانیه)	SIR <sub>out</sub> (dB)	SIR <sub>in</sub> (dB)	نام فیلتر
۱	۵/۲۰۳۴۱۸	-۵/۲۲۶۸	-۱۹/۳۷۱۳	LMS
۱	۱/۵۴۹۶۲۶	۱۴/۰۷۹۶	-۱۹/۳۷۱۳	NLMS
۲	۱/۱۵۵۳۵۸	۱۱/۵۹۰۲	-۱۹/۳۷۱۳	SDLMS
۲	۱/۱۸۱۸۵۸	-۱۷/۷۹۴۹	-۱۹/۳۷۱۳	SSLMS
۲	۱/۳۹۲۹۳۷	۷/۱۳۲۱	-۱۹/۳۷۱۳	SELMS
۱	۹۶/۱۴۴۰۰۵	۲۱/۲۸۷۲	-۱۹/۳۷۱۳	RLS
۱	۲۹/۱۵۳۷۱۳	۳۷/۳۱۵۰	-۱۹/۳۷۱۳	Kalman
۲	۱۶۳۱/۲۶۸۳۰۸	۴۰/۳۲۵۰	-۱۹/۳۷۱۳	الگوریتم پیشنهادی

الگوریتم پیشنهادی توانست نسبت به فیلترهای سازنده اش دقت را بهبود دهد اما زمان پردازش آن افزایش یافت. این الگوریتم نسبت به سایر روش های پیاده شده دارای بالاترین دقت است.

جدول (۸): مقایسه فیلتر پیشنهادی با کالمن و NLMS

الگوریتم پیشنهادی	نام فیلتر
3dB	میزان بهبود نسبت به کالمن

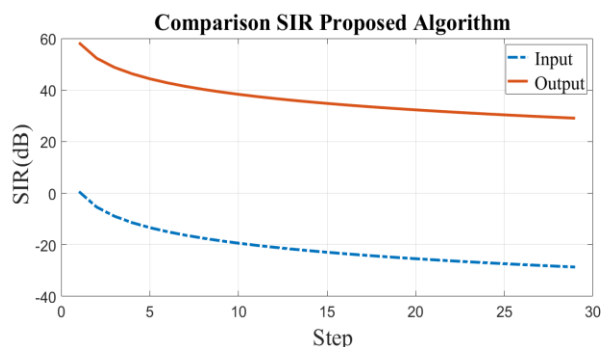
در هر بخش نمودار SIR<sub>out</sub> برای هر روش به صورت جداگانه رسم شد. در شکل (۲۲) برای مقایسه خروجی فیلترها تمام خروجی ها در یک نمودار آورده شده است.



شکل (۲۲): مقایسه نمودار SIR خروجی فیلترها

همان طور که قبلاً گفته شد هرچه فیلتر وقتی بهتر عمل کند نمودار SIR آن بالاتر قرار می گیرد. بعد از رسم نمودار SIR خروجی فیلترها، مشاهده شد که روش پیشنهادی از سایر فیلترها عملکرد بهتری دارد. در اکثر مقالات برای مشاهده نتیجه فیلترها به رسم نمودار SIR نسبت به SIR ورودی پرداخته می شود. در این مقاله نیز برای مقایسه روش پیشنهادی با سایر روش ها شکل (۲۳) رسم شده است.

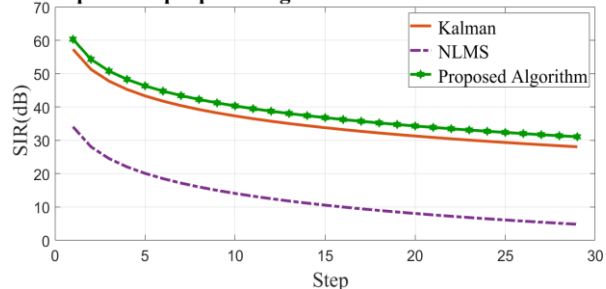
۴۰/۳۲۵۰ است. برای مشاهده تأثیر این فیلتر بر تداخل ها با نسبت های مختلف، نمودار شکل (۱۹) رسم شده است.



شکل (۱۹): نمودار SIR خروجی نسبت به SIR ورودی الگوریتم پیشنهادی

برای درک بهتر دقت بالای این فیلتر نمودار SIR خروجی فیلتر پیشنهادی و فیلتر کالمن و فیلتر NLMS به صورت یکجا رسم شده اند. نمودار SIR فیلتر پیشنهادی بالاتر از فیلتر کالمن قرار گرفت.

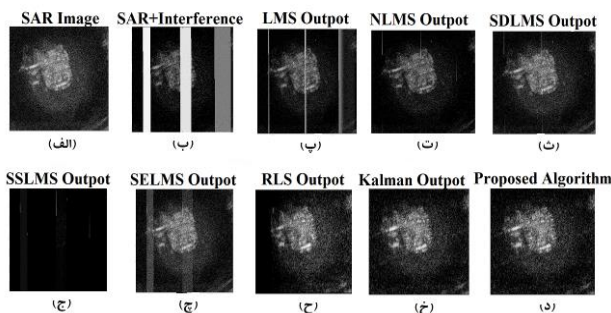
Compare the proposed algorithm with its constructor filters



شکل (۲۰): مقایسه نمودار SIR خروجی فیلتر پیشنهادی نسبت به فیلتر کالمن و NLMS

## ۵-۱- مقایسه انواع روش ها

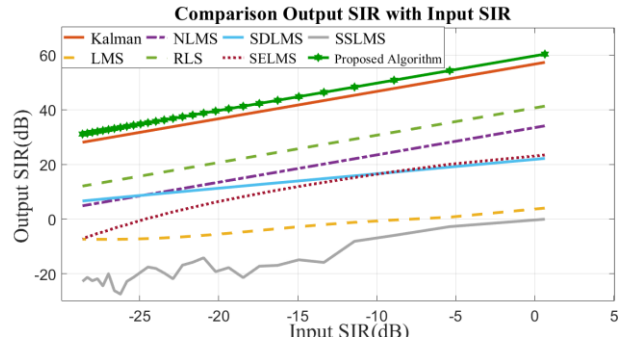
تمامی روش ها با یک لپ تاپ مجهز به CPU Intel مدل i7-core HQ 6700 و مقدار ۱۶ گیگابایت رم مقایسه شدند. از آنجا که اکثر الگوریتم های وقتی پیچیدگی کمی دارند برای مقایسه آن ها و پایین آوردن خطا اندازه گیری، ۳۰ مرتبه فیلتر برای SIR مختلف اجرا شد و زمان پردازش ثبت گردید. در شکل (۲۷) تصویر اصلی، تصویر با تداخل و تصویر بعد از کاهش تداخل با روش های مختلف قابل مشاهده است.



شکل (۲۱): مقایسه تصویر خروجی فیلترها بعد از کاهش تداخل با یکدیگر



گردید دقت الگوریتم پیشنهادی، حدوداً 3dB نسبت به فیلتر کالمن بهبود یافت. سرعت الگوریتم پیشنهادی ۵۵ مرتبه نسبت به فیلتر کالمن کمتر شده است. با توجه به نتایج ارائه شده توصیه می‌گردد در صورت نیاز به دقت بالا و داشتن سخت افزار قوی برای محاسبات، بهتر است از فیلتر پیشنهادی به منظور حذف تداخل در رادار روزنه مصنوعی استفاده گردد. پیشنهاد می‌گردد محققان برای کارهای آتی در این زمینه از روش تشخیص تداخل به کمک شبکه عصبی کار کنند. زیرا اگر تداخل به صورت دقیق تشخیص داده شود طبیعتاً کاهش تداخل با دقت بالاتری انجام می‌گردد و حتی به علت استفاده از یک فیلتر خاص ممکن است باعث افزایش سرعت نیز گردد.



شکل (۲۳): مقایسه نمودار SIR خروجی بر حسب SIR ورودی برای تمام فیلترها

همان طور که مشاهده شد در شرایط SIR ورودی یکسان، SIR در خروجی الگوریتم پیشنهادی، نسبت به سایر فیلترها بیشتر است. الگوریتم پیشنهادی نسبت به تمامی فیلترها و حتی فیلترهای تشکیل دهنده آن عملکرد بهتری دارد. بنابراین الگوریتم پیشنهادی به عنوان روش بهبود یافته معرفی می‌گردد.

## ۶- نتیجه گیری

در این مقاله بعد از شبیه سازی انواع سیگنال تداخل، این تداخل ها بر روی سیگنال رادار روزنه مصنوعی اعمال شدند. انواع فیلترهای وقتی در شرایط یکسان برای کاهش تداخل در سیگنال رادار روزنه مصنوعی در نرم افزار متلب پیاده سازی گردید. با توجه به نتایج شبیه سازی ها، فیلتر LMS نتوانست تداخل را به خوبی کاهش دهد و حتی تداخل نوع سوم بدون تغییر باقی ماند. فیلتر NLMS تصویر را تا حدی بهبود داد. این فیلتر ۳ برابر سریع تر از فیلتر LMS عمل کرد. فیلتر SSLMS موجب حذف کامل تصویر شد که استفاده از آن جهت کاهش تداخل بی نتیجه است. فیلتر SELMS اندکی تصویر را بهبود داد اما آثار تداخل در تصویر باقی ماند. دقت این فیلتر نصف فیلتر NLMS است. فیلتر SDLMS تصویر را بهبود داد و در کاهش تداخل نوع سوم نسبت به سایر تداخل ها بهتر عمل نمود. زمان پردازش در فیلتر SDLMS نسبت به NLMS ۳۴٪ کمتر است. فیلتر RLS تصویر را بهبود داد و در کاهش تداخل نوع دوم و سوم تأثیر بهتری داشت و هنگام کاهش تداخل نوع اول موجب حذف تصویر گردید. زمان پردازش این فیلتر بسیار زیاد است و ۶۲ برابر کندتر عمل نمود. فیلتر کالمن تصویر را بهبود داد و در کاهش هر سه نوع تداخل به طور یکسان عمل نمود. در میان فیلترهای وقتی تصویر خروجی فیلتر کالمن از کیفیت بالاتری برخوردار است. حتی از نظر زمان پردازش بیشتر از سه برابر نسبت به فیلتر RLS سریع تر عمل نمود. اما زمان پردازش آن نسبت به سایر فیلترها حدود ۲۴ برابر کندتر است. فیلتر RLS بعد از فیلتر کالمن نتیجه کمی خوبی نسبت به سایر فیلترها دارد؛ اما استفاده از این فیلتر به دلیل حذف بخشی از تصویر و سرعت پایین توصیه نمی‌شود. برای رسیدن به کاهش بهتر تداخل یک الگوریتم ترکیب شده از فیلتر کالمن و فیلتر NLMS به عنوان الگوریتم پیشنهادی ارائه گردید. بعد از پیاده سازی الگوریتم پیشنهادی مشاهده

## مراجع

- [1] Ma. X.Y, Qin. J.M, He. Z.H, Yang. J, Lu. Q.H, "Three-channel cancellation of SAR blanketing jamming suppression", Acta Electron. Sin. 2007, 35, 1015-1020.
- [2] Moreira. A, Prats-Iraola. P, Younis. M, Krieger. G, Hajnsek. I, Papathanassiou, K.P, "A tutorial on synthetic aperture radar", IEEE Geosci. Remote Sens. Mag. 2013, 1, 6-43.
- [3] CANER ÖZDEMİR, "Inverse Synthetic Aperture Radar Imaging with MATLAB Algorithms", 2012.
- [4] Tao. M, Zhou. F, Zhang. Z, "Wideband interference mitigation in high-resolution airborne synthetic aperture radar data", IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2015, 54, 74-87.
- [5] Su. J, Tao. H, Tao. M, Xie. J, Wang. Y, Wang. L, "Time-Varying SAR Interference Suppression Based on Delay-Doppler Iterative Decomposition Algorithm", Remote Sens. 2018, 10, 1491.
- [6] Huang. Y, Liao. G, Li. J, Xu. J, "Narrowband RFI suppression for SAR system via fast implementation of joint sparsity and low-rank property", IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2018, 56, 2748-2761.
- [7] Weiwei Fan, Feng Zhou Mingliang Tao, "Interference Mitigation for Synthetic Aperture Radar Based on Deep Residual Network", Licensee MDPI, 11 July 2019.
- [8] Yang. Z, Du. W, Liu. Z, Liao. G, "WBI suppression for SAR using iterative adaptive method", IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote Sens. 2016, 9, 1008-1014.
- [9] Yi, J, Wan, X, Cheng, F, Gong, Z, "Computationally efficient RF interference suppression method with closed-form maximum likelihood estimator for HF surface wave over-the-horizon radars", IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2013, 51, 2361-2372.
- [10] Elgamel, S.A. Soraghan, J.J. "Using EMD-FrFT filtering to mitigate very high power interference in chirp tracking radars", IEEE Signal Process. Lett. 2011, 18, 263-266.
- [11] Zhou, F, Tao, M, "Research on methods for narrow-band interference suppression in synthetic aperture radar data", IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. 2015, 8, 3476-3485.
- [12] Natsuaki. R, Motohka. T, Watanabe. M, Shimada. M, Suzuki. S, "An autocorrelation-based radio frequency interference detection and removal method in azimuth-frequency domain for SAR Image", IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote Sens. 2017, 10, 5736-5751.
- [13] Tao. M, Zhou. F, Liu. J, Liu. Y, Zhang. Z, Bao. Z, "Narrow-band interference mitigation for SAR using

- independent subspace analysis", IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2014, 52, 5289–5301.
- [14] Huang. Y, Liao. G, Li. J, Xu. J, "Narrowband RFI suppression for SAR system via fast implementation of joint sparsity and low-rank property", IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2018, 56, 2748–2761.
- [15] Kerry E. Dungan, a Joshua N. Ash, "Wide Angle SAR Data for Target Discrimination Research", Proc.SPIE 8394, 8394-21, (2012).
- [16] Li. Y.L, Li. X.Y, Zhou. Z.M, "Side-lobe reduction for radio frequency interference suppression via clipping of strong scatterers", IEEE Geosci. Remote Sens. Lett. 2016, 13, 1178–1182.
- [17] Matuszewski. J, "Radar signal identification using a neural network and pattern recognition methods.In Proceedings of the 2018 14th International Conference on Advanced Trends in Radio electronics, Telecommunications and computer Engineering (TCSET)", Lviv-Slavske, Ukraine, 20-24 February 2018;pp. 79-83
- [18] Yu. J, Li. J, Sun. B, Chen. J, Li. C, "Multiclass Radio Frequency Interference Detection and Suppression for SAR Based on the Single Shot Multi Box Detector", Sensors 2018, 18, 4034.
- [19] Mingliang Tao, Jia Su, Yan Huang "Mitigation of Radio Frequency Interference in Synthetic Aperture Radar Data: Current Status and Future Trends", Licensee MDPI, Basel, Switzerland. 21 October 2019.

[۲۰] سهرابی سکینه، کلانتری محمد، رشیدی کنعان حمیدرضا، "الگوریتم بهینه سازی ترکیبی با استفاده از الگوریتم ژنتیک و جستجوی مبتنی بر نظریه آشوب"، نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران، شماره ۳ دوره ۱۶، شماره صفحه‌ها ۱۴۵ تا ۱۵۷، انجمن مهندسی برق و الکترونیک ایران، ۱۳۹۸.

## زیر نویس ها

- <sup>1</sup> Radio Detection And Ranging (RADAR)
- <sup>2</sup> Synthetic Aperture Radar
- <sup>3</sup> Notch Filter (band-stop filter)
- <sup>4</sup> Iterative Decomposition Algorithm (IDA)
- <sup>5</sup> Real Aperture Radar (RAR)
- <sup>6</sup> Spatial Resolution
- <sup>7</sup> Strip-map
- <sup>8</sup> Spotlight
- <sup>9</sup> Range
- <sup>10</sup> Azimuth
- <sup>11</sup> Azimuth Resolution
- <sup>12</sup> Range Resolution
- <sup>13</sup> Narrowband Interference
- <sup>14</sup> Wideband Interference
- <sup>15</sup> Radio Frequency Noise Interference
- <sup>16</sup> Narrowband Linear Frequency Modulated Interference
- <sup>17</sup> Wideband Linear Frequency Modulated Interference
- <sup>18</sup> Adaptive Filter
- <sup>19</sup> Mean Square Error
- <sup>20</sup> Signal-to-Interference Rate